

7) повышенный выход экологических выбросов в атмосферу, что потребует постоянного их контроля и сокращения.

### Список использованных источников

1. Монастырев А.В. Производство извести. – М.: Высшая школа, 1986. – 192 с.
2. Учебное пособие для вузов / С.Н. Гущин, С.Г. Майзель, В.И. Матюхин, В.А. Гольцев. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 230 с.
3. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. – М.: Теплотехник, 2004. – 592 с.

УДК 669.187.2.036.61

**И. М. Ячиков<sup>1</sup>, И. В. Портнова<sup>1</sup>, М. В. Быстров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия;

<sup>2</sup> ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина», г. Екатеринбург, Россия

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УГАРА ГРАФИТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЕГО ИСПАРИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

### Аннотация

Значительную часть затрат в себестоимости произведенных отливок готовой продукции в литейном производстве составляет стоимость графитированных электродов, поэтому снижение их удельного расхода является актуальной задачей. С помощью компьютерного моделирования проведен анализ влияния испарительного охлаждения водой боковой поверхности графитированных электродов на их расход для дуговых печей трехфазного переменного тока вместимостью 3 т. Установлено, что при расходе воды 0,15 м<sup>3</sup>/ч на каждый электрод диаметром 250 мм приводит к снижению угара графита примерно на 45 %. Выявлено, что подача воды в систему испарительного охлаждения для холодных электродов наиболее рациональна через 6–7 минут после включения тока. Существует оптимальный расход воды, соответствующий минимуму затрат на графитированные электроды и дополнительную электроэнергию. Использование испарительного охлаждения графитированных электродов в дуговых печах может быть рекомендовано для снижения их расхода на действующих и проектируемых дуговых печах малой емкости.

**Ключевые слова:** дуговая печь, графитированный электрод, испарительное охлаждение, угар графита.

### Abstract

A significant part of the cost in the cost of castings of finished products in the foundry industry is the cost of graphite electrodes, therefore, reducing their specific consumption is an important task. Using computer simulation, analysis of the effect of evaporative cooling of water on the lateral surface of graphite electrodes on their consumption for three-phase AC arc furnaces with a capacity of 3 tons was carried out. by about 45 %. It was revealed that the supply of water to the evaporative cooling system for cold electrodes is the most rational 6–7 minutes after switching on the current. There is an optimal water consumption corresponding to the minimum cost of graphite electrodes

*and additional electricity. The use of evaporative cooling of graphite electrodes in arc furnaces can be recommended to reduce their consumption in existing and projected arc furnaces of small capacity.*

**Key words:** *arc furnace, graphite electrode, evaporative cooling, graphite waste.*

Для повышения конкурентоспособности металлургические предприятия России, в том числе и малые литейные, вынуждены искать пути по снижению себестоимости своей продукции. Например, затраты на производство литейных сплавов в себестоимости произведенных отливок составляют более 50% от общих затрат на изготовление литья [1]. При производстве литейных сплавов в дуговых печах трехфазного тока (ДСП) существенную долю затрат составляет стоимость графитированных электродов (ГЭ), которая порой превышает плату за электроэнергию. Отсюда снижение удельного расхода ГЭ была и остается актуальной задачей.

Из литературы известно довольно много способов снижения расхода ГЭ, они, прежде всего, связаны с обработкой поверхности электрода инертными или углеводородными газами, нанесением на поверхность покрытий с высокими адгезионными свойствами или огнеупорных антиокислительных покрытий [2–5]. Основными недостатками данных приемов является высокая стоимость используемых компонентов, довольно сложная аппаратура и методика нанесения покрытий, то есть удорожанием ГЭ. Это во многом уменьшает экономический эффект по повышению стойкости ГЭ и сокращению общих затрат на изготовление литья, что снижает эффективность использования предлагаемых вариантов непосредственно в литейном производстве.

Расход ГЭ при работе ДСП во многом зависит от их теплового состояния. Так основными статьями расхода материала электрода являются окисление его боковой поверхности под воздействием температуры (37,8 %) и термомеханическое разрушение и износ (35 %) [6]. Существуют способы по снижению температуры графитированного электрода за счет его принудительного охлаждения: подача через осевой канал ГЭ аргона или природного газа [7]; применение испарительного охлаждения его боковой поверхности [6, 8].

Наиболее перспективным является снижение температуры электрода и его экранирование от окисления за счет использования системы испарительного охлаждения. Она представляет собой систему подачи воды орошением на боковую цилиндрическую поверхность электродов и состоит из кольца испарительного охлаждения, которое монтируется вокруг каждого электрода несколько ниже электрододержателя. Подобная система охлаждения ГЭ уже более 10 лет работает на ПАО «ММК» на двух печах ДСП-180. Возникает вопрос об эффективности испарительного охлаждения для печей малой мощности, используемых в литейном производстве и работающих с полным циклом.

Целью работы является теоретический анализ эффективности испарительного охлаждения водой боковой поверхности графитированных электродов в дуговых печах малой вместимости.

Для изучения роли испарительного охлаждения на тепловое состояние ГЭ использовалась компьютерная программа [9], созданная по математической

модели, описанной в работе [6]. Программа позволяет определять динамику теплового состояния и угара графита для исходного цилиндрического ГЭ в зависимости от его геометрии, проходящего через него тока и параметров водяного охлаждения.

При проведении компьютерного моделирования в качестве печи малой емкости была выбрана ДСП вместимостью 3 т Асбестовского ремонтно-механического завода, используемая для выплавки стали 110Г13Л. Расход ГЭ для этой печи составляет 40 т/год, при удельном расходе электродов – 8–10 кг/т.

Для проведения компьютерного моделирования приняты следующие исходные данные:

- *геометрические*: диаметр ГЭ – 250 мм, длина электрода в печи – 1800 мм [10];

- *теплофизические свойства ГЭ*: удельная теплоемкость – 2,1 кДж/(кг·К); плотность – 1700 кг/м<sup>3</sup>; степень черноты графита – 0,71; удельное электрическое сопротивление – 5 мкОм·см; коэффициент теплопроводности – 120 Вт/(м·°С);

- *технологические*: действующее значение тока дуги 4,8 кА; начальная температура ГЭ – 20 °С; приэлектродное падение напряжения на дуге – 8 В; степень черноты футеровки – 0,93; рабочая температура футеровки – 1400 °С; температура печных газов – 1200 °С;

- *для охлаждающей ГЭ воды*: начальная температура – 20 °С; теплота парообразования – 2,3 МДж/кг; степень черноты воды – 0,5; скорость стекания воды по боковой поверхности ГЭ – 0,3 м/с; время включения испарительного охлаждения после ввода холодных электродов – 60 с.

В результате компьютерного моделирования получена зависимость угара ГЭ от времени его нахождения в печи под током при наличии и отсутствии испарительного охлаждения для ДСП-3 (рис. 1). Установлено, что при подаче воды с расходом 0,1 м<sup>3</sup>/ч, угар электрода уменьшается на 20 %. При подаче воды с расходом 0,2 м<sup>3</sup>/ч расход ГЭ снижется примерно в 2 раза.

Однако необходимо принимать во внимание, что для трех электродов при подаче на каждый 0,1 м<sup>3</sup>/ч воды на ее испарение дополнительно требуется 690 Мдж ≈ 192 кВт·ч электроэнергии, что влияет на экономическую эффективность снижения расхода электродов. Отсюда можно сделать вывод, что существует оптимальный расход воды соответствующий минимуму затрат на графитированные электроды с учетом их снижения расхода и электроэнергии. Он во многом определяется стоимостью этих ресурсов. В данном случае для ДСП-3 при существующем уровне цен рациональный расход воды на каждый электрод составляет 0,15 м<sup>3</sup>/ч, что дает снижение расхода электродов примерно на 45 %.

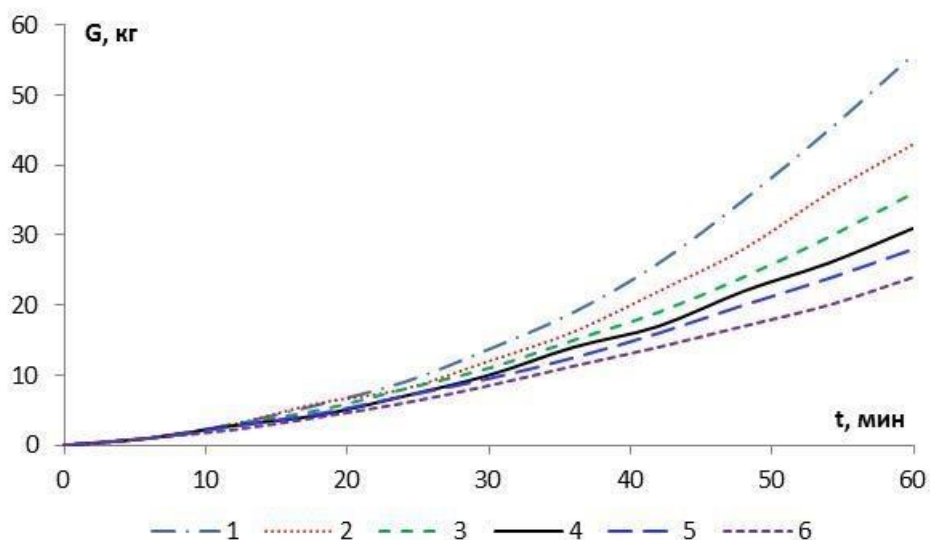


Рис. 1. Угар графитированного электрода от времени его нахождения в печи ДСП-3 под током при наличии и отсутствии испарительного охлаждения при разных расходах воды, м³/ч: 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,15; 5 – 0,2; 6 – 0,3

В процессе моделирования было выявлено, что охлаждение еще холодного электрода не рационально, поэтому если в печь подаются холодные электроды, то начинать подачу воды в систему испарительного охлаждения необходимо, начиная с 6–7 минуты после включения тока.

Для ДСП-3 получены зависимости изменения толщины водяной пленки по длине графитированного электрода от места спрейерной подачи воды при ее разных расходах на его охлаждение при средней скорости ее стекания по боковой поверхности ГЭ 0,3 м/с (рис. 2). Установлено, что с увеличением расхода воды возрастают толщина стекающей водяной пленки и длина зоны непосредственного теплового воздействия испарительного охлаждения. Вода эффективно экранирует электрод от воздействия излучения дуги, футеровки печи и конвекции печных газов.

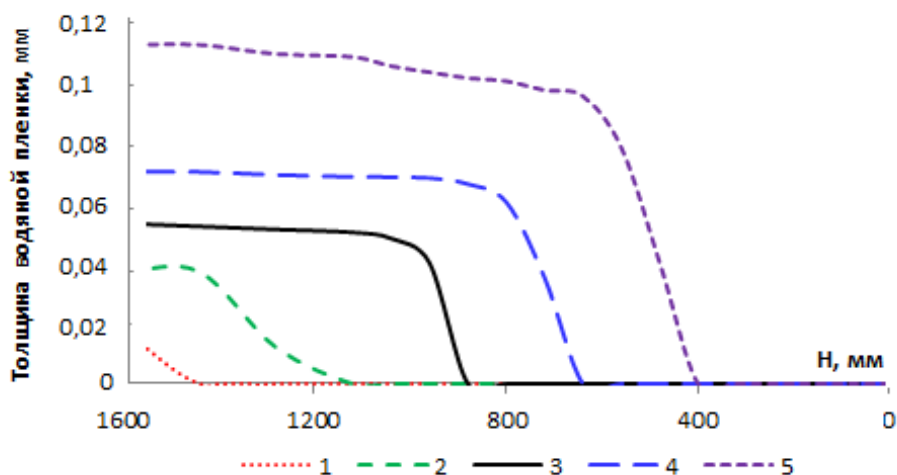


Рис. 2. Зависимость толщины водяной пленки по высоте графитированного электрода в ДСП-3 при разных расходах воды на его охлаждение, м³/ч: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,3

### *Выводы*

1. Установлено, что применение водяного испарительного охлаждения в ДСП-3 приводит к снижению температуры, прежде всего, в верхней части графитированного электрода. При расходе воды 0,15 м<sup>3</sup>/ч на каждый электрод приводит к снижению утара графита примерно на 45 %. Начало работы системы испарительного охлаждения наиболее рационально через 6-7 минут после включения тока.

2. Существует оптимальный расход воды соответствующий минимуму суммы затрат на графитированные электроды с учетом снижения их расхода и дополнительную электроэнергию на испарение воды.

3. Использование испарительного охлаждения графитированных электродов может быть рекомендовано для снижения их расхода как на действующих, так и на проектируемых дуговых сталеплавильных печах малой емкости. Расходы охлаждающей воды выбираются из минимума затрат.

### **Список использованных источников**

1. Моргунов В.Н. Печи литейных цехов. Характеристика, анализ, классификация.: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. 179 с.
2. Грудницкий О.М., Исхаков Р.А.-Р., Коробов В.К. Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электросталеплавильных печах // Литье и металлургия, 2011. № 1. С. 100–101.
3. Schwabe W.E. The Mechanics of Consumption of Graphite Electrodes in Electric Steel Furnaces // Electric Furnace Proceedings, 1971. pp. 140–145.
4. Грудницкий О.М., Рожков А.И. Феклистов А.В. Влияние климатического фактора на удельный расход графитированных электродов // Литье и металлургия, 2012. № 2. С. 94–97.
5. Дыскина Б.Ш., Кабанова Т.В. Использование техногенных отходов уральского региона для защиты графитированных электродов // Успехи в химии и химической технологии. Т. 28. 2014. № 10. С. 39–41.
6. Mokhov V.A., Yachikov I.M. Simulation of the thermal state of graphitized electrodes in an arc furnace with allowance for evaporation cooling / Russian metallurgy (Metally). 2013. Vol. T. 2013. No. 6. С. 465–470.
7. Ячиков И.М., Портнова И.В., Быстров М.В. Моделирование теплового состояния графитированного электрода при подаче газа в осевой канал // Труды XV конгресса сталеплавильщиков. М.: ООО «РПК ПринтАП», 2018. С. 180–186.
8. Yachikov I.M., Portnova I.V., Bystrov M.V. Efficiency of Application of Evaporative Cooling of Graphite Electrodes to Reduce their Consumption in Arc Furnaces / Materials Science Forum, Vol. 946, pp. 444-449, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.444>
9. Ячиков И.М., Быстров М.В., Портнова И.В. Моделирование теплового состояния электрода ДСП // Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017617959.
10. ГОСТ МЭК 60239–2014 Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.